

Método integral configurable y flexible de ensayo de materiales consumibles de soldadura por arco eléctrico.

A. García Rodríguez.

Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), Facultad de Ingeniería Mecánica,
Universidad Central de Las Villas, CUBA.
Carretera a Camajuaní Km 5 ½. Código Postal 54830.
Fax: 5342281608, E-mail: alejo2@fim.uclv.edu.cu

(Recibido el 11 de Noviembre de 2004, aceptado el 15 de Enero de 2005)

Resumen.

La presente publicación propone un método integral configurable y flexible para facilitar el ensayo de materiales consumibles de soldadura por arco eléctrico en las condiciones tecnológicas para las que han sido diseñados estos materiales, en relación a la calidad de la unión soldada. Se puede llegar a conclusiones definitivas sobre la calidad de la soldadura usando un determinado material consumible mediante: la relación operacional de técnicas de inteligencia natural y/o artificial, el uso de sistemas expertos, el trabajo con bases de datos, la simulación y la realización práctica del proceso mientras se registran ciertos parámetros del arco eléctrico, digitalmente procesados estadísticamente y relacionados a los resultados de la caracterización de la unión soldada. El método permite registrar adecuadamente la información referente a cada aspecto del proceso exigida en los procesos de certificación de la calidad de los consumibles, así como en la investigación dirigida a optimizar la composición química y las propiedades físicas de un material, para obtener calidades óptimas en un determinado proceso; además es posible obtener las bases de datos de parámetros del arco eléctrico útiles para investigar, desarrollar y valorar métodos y algoritmos para el monitoreo en tiempo real de la calidad de la soldadura durante un determinado proceso tecnológico de soldadura con arco eléctrico.

Palabras Clave: Ensayo, materiales, soldadura, arco eléctrico, estabilidad, calidad, simulación, optimización, unión soldada.

1. Introducción.

El arco eléctrico de soldadura es una descarga eléctrica sostenida de alta intensidad de corriente (100-1500 A) y relativamente bajos valores de voltaje (20-50 V), a través de un plasma conductor, que produce suficiente energía térmica (400-4000 cal/s), la cual es útil para unir metales por fusión. El arco eléctrico de soldadura es una condición estable mantenida en el espacio entre el final del electrodo y la pieza, que también transporta la corriente /1/.

El arco eléctrico de soldadura es una descarga eléctrica en un gas ionizado: plasma. El mismo difiere de otros tipos de descargas en gases por las condiciones en que tiene lugar el transporte de portadores energéticos (corriente) /2/.

Los distintos sistemas de soldadura con arco eléctrico ocupan un lugar importante en las tecnologías modernas de soldadura. El electrodo puede ser de tipo no consumible o consumible, el electrodo consumible se funde y se deposita en la pieza de trabajo /3/.

Algunos de los parámetros a controlar para un adecuado desempeño del proceso se relacionan al control de potencia y las formas de onda suministradas al electrodo, movimientos del cabezal de soldadura durante el proceso, movimiento a otros puntos de soldadura, control del gas para proteger la charca de metal fundido de la oxidación a altas temperaturas y proveer un plasma ionizado para el arco y otros aspectos como la estabilidad del arco, especialmente importante para el control de la calidad de la soldadura /3/.

La estabilidad del arco eléctrico de soldadura se encuentra afectada por varios factores tales como la longitud del arco, la intensidad de corriente, la velocidad de soldadura, la atmósfera gaseosa, el diámetro de los electrodos, su composición química, la dinámica de la fuente, entre otros. La medición en tiempo real del voltaje y la corriente de soldadura y su procesamiento permiten establecer criterios de estabilidad, tanto para el control automático, como para el control de la calidad durante el proceso de soldadura /1/.

Durante el proceso de diseño y fabricación de un nuevo material deben tenerse en cuenta un grupo de

consideraciones variables en cada material específico, este material debe ser debidamente caracterizado y probado bajo las condiciones de soldadura en las que fue diseñado.

El Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), de la Universidad Central de Las Villas, CUBA, potencia desde sus inicios hace unos 17 años la línea de investigación de Materiales para Soldar, obteniendo excelentes resultados en el diseño y fabricación de electrodos y fundentes. Presenta además una línea de Tecnología de la Soldadura y una línea de Diagnóstico y Pronóstico de Fallas, mediante las cuales se profundiza en la calidad de la soldadura en distintos procesos.

En el país existe una amplia demanda de electrodos y fundentes, en estos momentos se está implementando una Fábrica multipropósito de producción de materiales, a partir de materias primas cubanas. Se dirige en nuestro centro un proyecto Nacional de Nuevos Materiales donde se inserta el tema de la caracterización de materiales consumibles como aspecto importante en el diseño y la puesta a punto de estos consumibles de soldadura.

2. Planteamiento del problema.

1. El proceso de diseño y fabricación de un determinado consumible para soldar culmina en el proceso de prueba, requiriendo en su etapa definitiva que el nuevo material sea sometido a los procesos de soldadura y los regímenes de trabajo específicos para los que ha sido diseñado /4/.
2. Existe una tendencia a la optimización de la composición química y las propiedades físicas de un material consumible mediante corridas experimentales, mientras se registran determinados parámetros en tiempo real durante el proceso, para un determinado procesamiento estadístico, relacionado a los resultados de la caracterización químico-física y estructural de la unión soldada después del proceso. De esta forma se constatan los resultados sobre la valoración de la calidad de la soldadura, la estabilidad del proceso y la geometría del cordón, obtenidos en tiempo real durante el proceso, con los resultados de los métodos tradicionales de caracterización de la unión soldada /4/.
3. Existen distintos métodos para inspeccionar la calidad de la soldadura, por ejemplo, prueba y error, inspección visual, pruebas destructivas, sentido del arco eléctrico. Generalmente los métodos industriales de monitoreo del proceso de soldadura y de su calidad, dependen en gran medida del conocimiento, la percepción sensorial y la experiencia de los soldadores, lo cual proporciona métodos de labor intensiva subjetivos y frecuentemente ineficientes. Existe una tendencia a analizar la soldadura después que ha sido hecha, lo cual no permite corregir errores operativos durante el proceso. Es muy aconsejable monitorear constantemente la estabilidad de

la soldadura, su calidad y geometría durante el proceso de soldadura en tiempo real, así como es especialmente importante tener un sistema que, basado en la realimentación del monitoreo pueda ajustar los parámetros del proceso para mejorar la estabilidad de la soldadura, su calidad y la geometría del cordón /5/.

4. Para un centro de diseño y fabricación de materiales para soldar, es de vital importancia disponer de un sistema de prueba de estos materiales, que permita un registro adecuado de la información generada en los procesos de diseño, fabricación, caracterización de la materia prima, caracterización del material consumible antes, durante y después del proceso de soldadura.

3. Descripción de métodos.

Preparando la prueba (antes de la prueba).

La tecnología moderna impone retos en la unión de piezas de materiales variados requiriendo materiales consumibles adecuados que garanticen ciertas características físico-químicas y estructurales en la unión soldada. Las formas geométricas de las piezas a unir, sus características químico-físicas, sus dimensiones, las condiciones ambientales y tecnológicas en las que debe realizarse el proceso, determinan por ejemplo, desde el tipo de preparación de borde en las piezas hasta el tipo de proceso de soldadura, el régimen de trabajo, el tipo de material consumible, etc. Para cada aplicación pueden existir una o varias combinaciones óptimas de estos y otros factores que proporcionan resultados óptimos en la soldadura.

El proceso de diseño y fabricación de materiales consumibles para la soldadura, culmina en la prueba del material en las condiciones para las que ha sido determinado el diseño, lo cual se expresa comercialmente en las especificaciones del fabricante. El análisis comparativo entre casos de materiales reportados comercialmente en bases de datos, permite una vez registradas las características de un nuevo material valorar de antemano su posible desempeño y la ubicación de un posible régimen de trabajo en un proceso específico.

La simulación del proceso de soldadura en las condiciones especificadas anteriormente, permite preliminarmente con cierto grado de incertidumbre evaluar el desempeño del proceso, registrándose los resultados y analizándose su validez con posibilidades de corregir posibles errores y de optimizar el régimen de soldadura inicialmente propuesto de forma virtual. De esta forma es posible valorar la factibilidad de iniciar el proceso con estas especificaciones, antes de lo cual se debe establecer un diagnóstico del equipamiento de soldadura para la detección de posibles fallas.

La figura #1, representa a groso modo un método de selección del régimen y el proceso de soldadura adecuado para probar un material específico en el

régimen de trabajo indicado según las especificaciones del fabricante.

Es de destacar que los diferentes recuadros debidamente enumerados representan unidades funcionales que pueden realizarse en unidades independientes o en unidades que integren además diferentes funciones según sea el caso, manteniendo una estrecha relación entre cada uno de sus componentes.

Especificaciones fabricante [1.1], se encarga, de obtener toda la información relativa al material en cuestión, por ejemplo la aplicación específica para la que fue diseñado, porcentaje de elementos químicos, propiedades físicas, entre otras.

Los datos deben ser automáticamente almacenados en la Base de Datos [1.2], que permite registrar convenientemente el nuevo material.

Análisis de casos [1.3], realiza un análisis de casos registrados basado en técnicas de inteligencia artificial, determinando los materiales semejantes de que se tiene

información, lo cual permite obtener información válida sobre las condiciones de prueba comprobando posibles errores en la adquisición de los datos realizada por el componente [1.1]. Finalmente entrega la información relativa al diseño de experimento necesario para comprobar las cualidades del material, teniendo en cuenta un estudio de casos anteriores.

Aunque el sistema permite pasar al componente Diseño tecnología soldadura [1.4], directamente, se recomienda a menos que se vayan a realizar experimentos con una tecnología determinada anteriormente, reportar el nuevo material en la base de datos y someterlo a un análisis preliminar.

Diseño tecnología soldadura [1.4], se encarga de realizar todos los cálculos necesarios para implementar práctica y teóricamente la tecnología de soldadura capaz de probar el nuevo material, partiendo de datos obtenidos de [1.3] o directamente de [1.1].

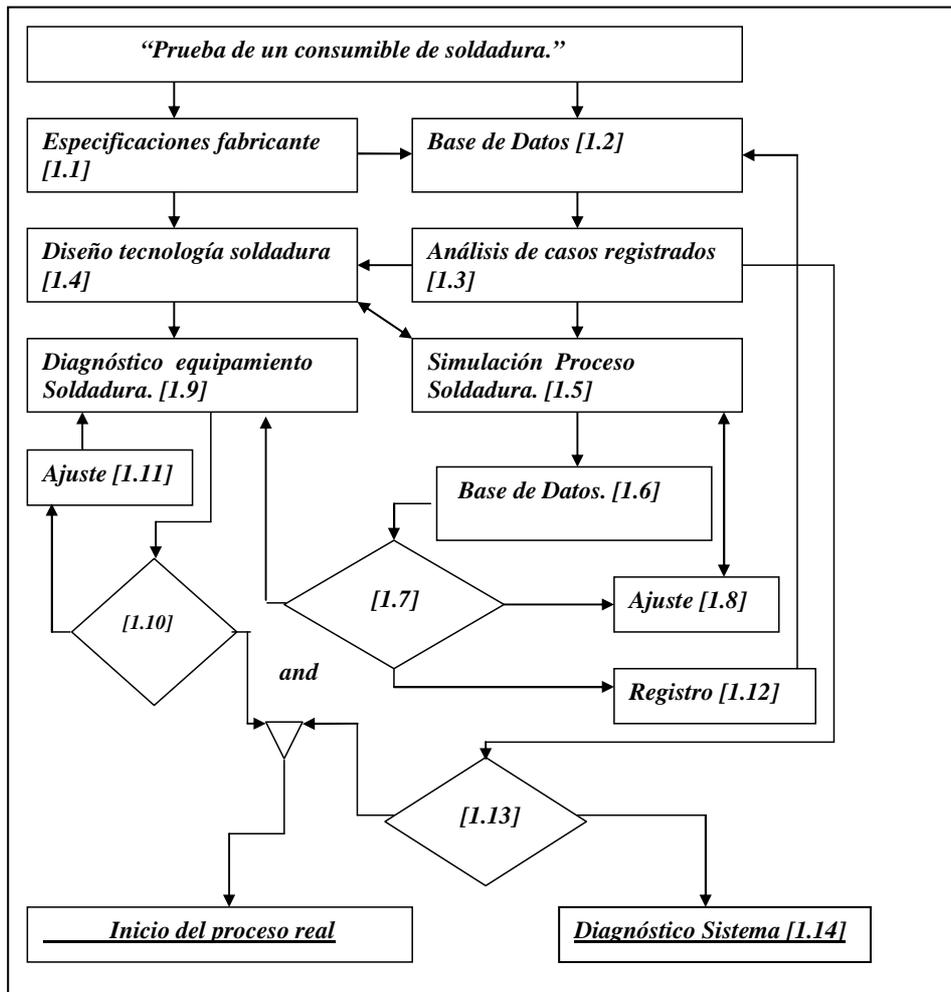


Figura 1. Prueba de un consumible de soldadura.

Simulación Proceso Soldadura [1.5], simula el proceso de soldadura en el régimen especificado y con el nuevo material registrando los resultados en la Base de Datos [1.6]

Esta base de datos contiene los datos de los resultados de la simulación relacionados a los datos de [1.2].

Diseño Adecuado? [1.7], comprueba la validez de los resultados de la simulación comparando con resultados teóricos y reajustando mediante su comunicación con Ajuste [1.8].

En caso de no existir coherencia en los resultados del proceso de simulación, se regresa a [1.4] y se reconsidera mediante inteligencia natural y/o artificial el diseño tecnológico inicial recomenzándose el proceso nuevamente.

En caso de que [1.7] determine que es válido el diseño, se pasa a la siguiente fase.

Diagnóstico Equipo Soldadura [1.9], se encarga de realizar el diagnóstico del equipamiento de soldadura, realizando una prueba de todas las partes constitutivas del equipo de soldadura, ya sean mecánicas, eléctricas o electrónicas. Por ejemplo, chequeo del circuito electrónico de una de las unidades inteligentes.

Adecuado? [1.10], evalúa el resultado del diagnóstico decidiendo si es necesario ajustar el equipo o si está en estado de funcionamiento óptimo.

Simultáneamente el componente Registro [1.12], actualiza la Base de Datos [1.2] con los resultados del diseño y la simulación válida para que puedan ser valorados en Análisis de Casos [1.3] que ahora determina si los resultados mantienen adecuada relación respecto a resultados obtenidos en condiciones suficientemente similares de un material típico de propiedades similares registradas anteriormente, en caso afirmativo y si y solo si el equipo de soldadura está en perfectas condiciones, se procede al paso hacia la fase siguiente.

En caso contrario, se requiere pasar al componente Diagnóstico Sistema [1.14], el cual puede determinar fallas en el funcionamiento de algunos de los componentes del sistema.

Durante la Prueba.

Para registrar adecuadamente la ocurrencia del proceso, se hace necesario utilizar una tecnología a prueba de fallos con diversos sistemas que relacionan diversos componentes intercomunicados garantizando la obtención de información fiable que permita llegar a consideraciones sobre la calidad de la soldadura.

En la figura #2 se esquematiza una tecnología para apoyar el diagnóstico de la soldadura hecha en las condiciones determinadas anteriormente, en este caso debemos definir lo que entenderemos por componente:

En este caso será una estructura que contiene hardware de computadora y/o software. Debido a la naturaleza de

los componentes, múltiples componentes pueden estar mezclados y a menudo no están separados unos de otros. Por otra parte un sistema es una estructura conteniendo uno o más componentes.

Antes de continuar debemos definir lo que se puede entender por Equipo para Soldar [2.1], se refiere a un hardware físico para producir soldadura, por ejemplo: Alimentador de alambre, punta de contacto, panel de mando, mezclador de gases, atomizador de gases, controlador de gas, reforzador, manipulador de movimiento del carro y otras partes, manipulador de brazo, rayo y antorcha para robot, trayectoria de unión láser, otros dispositivos de entrada y salida y la fuente de potencia aislada o con controladores, monitores, e interfases de comunicación asociadas con el hardware físico. De esta manera un equipamiento de soldadura moderno tiende a constar de un grupo de equipos que realizan determinadas funciones configurables en dependencia de las necesidades de la alta industria, cubriendo una amplia gama de procesos. Es de destacar que este equipamiento puede contener unidades de hardware y software de computadora y controladores de los diferentes dispositivos relacionados anteriormente.

Descripción de método y sistema.

Es una tecnología de soldadura conectada de forma operativa a un Sistema Local [2.13], es decir una computadora en la que un sistema experto natural y/o artificial, evalúa la calidad de la soldadura. El equipamiento de soldadura se encuentra vinculado a un grupo de componentes intercomunicados que permiten un diagnóstico de la calidad de la soldadura apoyados en la potencia de cálculo y procesamiento de la computadora.

Un componente Sensor [2.2], obtiene información respecto a la operación ON-LINE del equipo, y las características de la soldadura, basado en los componentes del Equipamiento Prueba [2.7], compuesto de medidores de corriente, voltaje y resistencia, proveedores de características de amplitud y frecuencia de voltaje y/o corriente y/o características de las soldaduras producidas por [2.1], y/o también el Equipamiento Monitoreo [2.6], que brinda imágenes obtenidas de cámaras digitales y/o cámaras de video).

Un componente Control [2.3], recibe información del Componente Sensor [2.2], y puede realizar una secuencia de prueba, para facilitar el diagnóstico del equipo de soldadura, basado al menos en parte en la información recibida de Sensor [2.2].

Diagnóstico [2.4], recibe información desde el Componente Sensor [2.2] y /o el Componente Control [2.3], realizando un diagnóstico interno de Equipo Soldar [2.1] basado en parte de la información recibida de Sensor [2.2], Control [2.3], Diagnóstico [2.4], este componente puede determinar el estado de funcionamiento del equipo y si tiene algún problema

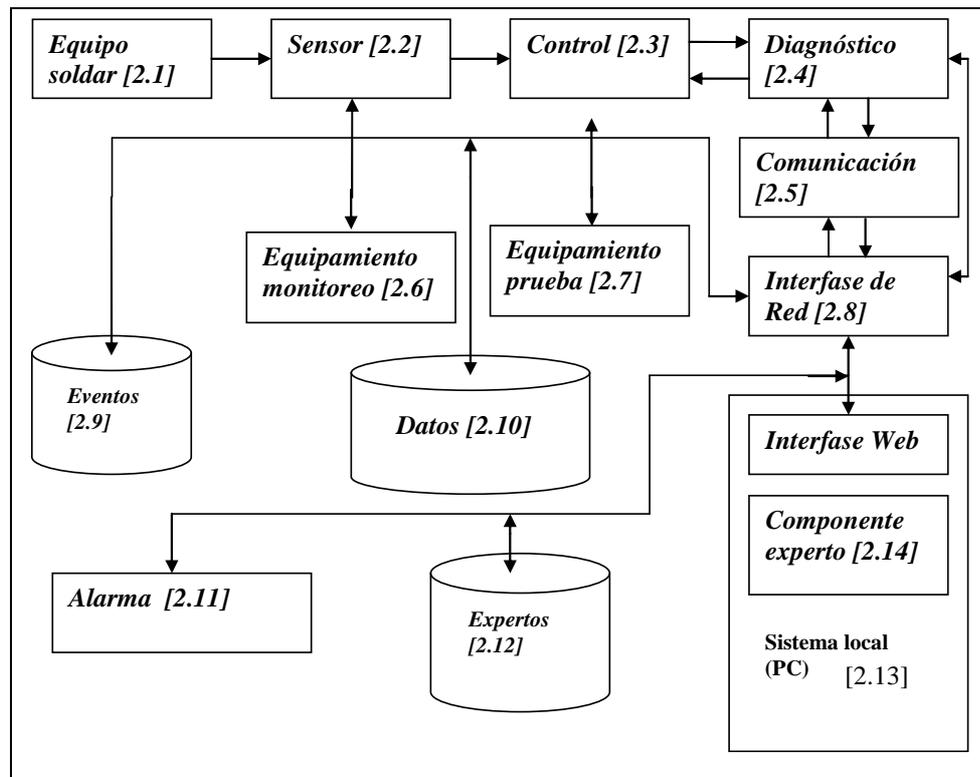


Figura #2 Tecnología para prueba de materiales consumibles durante un proceso de soldadura.

funcional manifiesto en una condición de alarma y/o una falla.

El sistema puede comunicar el estado de funcionamiento del equipamiento, condiciones de falla y/o alarma al Sistema local 2.13 (computadora), a través de Interfase de Red [2.8], en diferentes formatos debidamente conformados en Comunicación [2.5].

La información relativa al estado del equipamiento, y los problemas de funcionamiento pueden ser registrados además en Eventos [2.9]. El Sistema Local [2.13], presenta un Componente Experto [2.14], para apoyar el diagnóstico de la soldadura mediante el empleo de diferentes técnicas de inteligencia artificial relacionando los datos recibidos. El Componente Experto [2.14], puede adaptativamente modificar las técnicas de modelaje basado en sucesos históricos lo que permite aprender de los resultados de diagnósticos previos. Este componente es capaz de diagnosticar la calidad de la soldadura accediendo al almacén de datos Expertos [2.12], manipulado mediante una base de datos, que posee información indispensable para el diagnóstico de la soldadura.

Una base de Datos [2.10], almacena datos primarios que pueden ser utilizados para el diagnóstico de la soldadura por el Componente Experto [2.14].

Un componente Alarma [2.11], monitorea el desempeño del equipo estableciendo límites de alarma según la configuración proporcionada para las especificaciones tecnológicas del proceso.

La figura #3, esquematiza el algoritmo que ejecuta el sistema experto para determinar la calidad de la soldadura, analizando la información recibida de diferentes partes del sistema acorde a las condiciones de alarma previamente definidas.

Después de la prueba.

Una vez que los resultados del diagnóstico de la soldadura durante el proceso, resultan positivos, puede pasarse a la etapa más costosa de la prueba, la etapa de caracterización de la unión soldada.

Algunos aspectos importantes al valorar la calidad de la soldadura pueden ser las propiedades mecánicas del cordón, algunas de las cuales pueden apreciarse mediante una simple inspección visual, por ejemplo, es importante el grado de facilidad de desprendimiento de la escoria y una adecuada apariencia del cordón de soldadura. Otro aspecto importante es la relación ancho/profundidad del cordón que debe coincidir con los valores establecidos en las normas para diferentes aplicaciones. También se considera parte de las propiedades mecánicas por ejemplo la dureza en todas

las zonas de la unión, y la respuesta de la unión a ensayos de tracción, entre otras.

La metalografía permite auxiliándose del microscopio óptico, determinar características de tamaño y crecimiento de grano, así como hacer un análisis de los constituyentes microestructurales de la aleación obtenida, profundizando si es necesario con la ayuda del microscopio electrónico de barrido, en la caracterización química y física de posibles inclusiones, poros o grietas.

Para una caracterización profunda de la unión soldada se cuenta con ensayos de tipo destructivos, que requieren la ruptura de la unión soldada para acceder por ejemplo a zonas tales como la zona de influencia térmica en lugares aledaños a la raíz del cordón. En ocasiones afortunadas, es posible estimar la calidad de la unión soldada mediante la ejecución de uniones en

probetas normalizadas para un determinado número de aplicaciones lo cual está debidamente estipulado en las normas establecidas. Esto evitaría costosos ensayos destructivos sobre construcciones soldadas.

Los ensayos no destructivos, permiten obtener estimaciones sobre la calidad de la soldadura basado en técnicas de ultrasonido, radiografías, líquidos penetrantes, metalografía, dureza, etc. Los ensayos destructivos o no destructivos son en general costosos, y permiten obtener una valoración profunda de la calidad de la soldadura mediante el uso de tecnologías de avanzada.

Los datos y resultados de la valoración deben ser registrados en la Base de Datos Expertos [2.12], para definitivamente definir el grado de relación entre los eventos ocurridos antes, durante, y después del proceso.

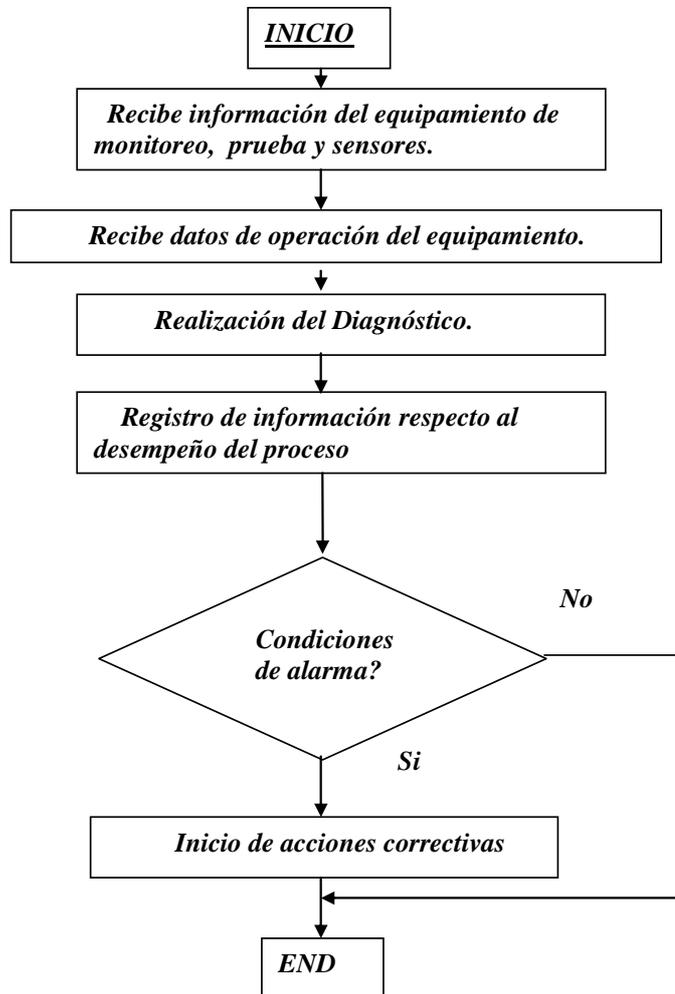


Figura #3 Algoritmo general de diagnóstico del sistema experto.

Resultados esperados.

Una base datos configurable según la aplicación, conteniendo información validada sobre resultados de:

Características químico-físicas y tecnológicas del material consumible, procedimientos de caracterización, resultados parciales y totales obtenidos de la simulación del proceso, informes de irregularidades en el proceso de simulación y ajustes necesarios, informes del proceso de diagnóstico del funcionamiento del equipamiento de soldadura antes y durante el proceso, registro de parámetros del arco durante el proceso de soldadura, resultados del procesamiento en tiempo real de los parámetros, informe sobre el desempeño del proceso y la calidad esperada de la soldadura, resultados de la caracterización química física y estructural de la unión soldada incluyendo sus procedimientos, informe definitivo de la calidad de la unión soldada acorde a los resultados obtenidos en los análisis anteriores, informe de los métodos, procedimientos, datos primarios, resultados y conclusiones que permiten arribar al informe definitivo.

Análisis de resultados.

Del análisis de los informes contenidos en las distintas secciones de la base datos puede obtenerse:

- Descripción pormenorizada y evaluación detallada del proceso de caracterización químico-física y tecnológica del material consumible, información crucial en la certificación de la calidad del producto.
- Evaluación del algoritmo del sistema de simulación. Permite disminuir la probabilidad de error en la caracterización del nuevo material, así como corregir los algoritmos y métodos utilizados en la simulación del proceso de soldadura específico. Es una herramienta de optimización y de ahorro de recursos.
- Caracterización funcional y chequeo del equipamiento antes y durante el proceso de soldadura específico. Aporta gran cantidad de datos indispensables para la reproducibilidad de los resultados.
- Valoración de la calidad esperada de la unión mediante procesamiento estadístico-matemático en tiempo real de los parámetros del arco eléctrico evaluando la geometría del cordón, la estabilidad del proceso y la calidad de la soldadura.
- Correlación entre los resultados del análisis por criterios de calidad valorados durante y después del proceso de soldadura. Permite validar algoritmos de procesamiento de parámetros que tienden a sustituir cuantiosos gastos en el proceso de caracterización de la unión soldada.

4. Conclusiones.

- Sistema integral de apoyo al ensayo de consumibles y de valoración de la calidad de la unión soldada en determinados procesos de soldadura con arco eléctrico.
- Sistema y método para registrar la información derivada de los procesos de diseño, fabricación y ensayo de un material consumible para determinadas aplicaciones de soldadura con arco eléctrico, útil para la investigación y los procesos de acreditación del producto según normas de calidad.

- Sistema y método de registro de parámetros del arco eléctrico en tiempo real relacionado a parámetros propios del equipamiento, propiedades de materiales consumibles, proceso de soldadura y calidad real de la unión soldada.

5. Bibliografía.

1. Howard B. Cary. Modern Welding Technology third edition. 1996.
2. Dr.Sc.techn.Martin Schellhase. Der Schweißlichtbogen-ein technologisches Werkzeug..Berlin 1985.
3. Dodge, Robert; et al. System and method for facilitating welding system diagnostics. United States Patent Application 20040215422, October 28, 2004.
4. N. M. R. De Rissone, J. P. Farias, I. De Souza Bott, and E. S. Surian ANSI/AWS A5.1-91 E6013 Rutile electrodes: The Effect of Calcite. Welding Journal Supplement 2002.
5. Hu, Shixin Jack; et al. Online monitoring system and method for a short-circuiting gas metal arc welding process. United States Patent Application 20040099648, May 27, 2004.
6. Hutchison, Richard; et al. Method and apparatus for welding. United States Patent Application. 20040238513, December 2, 2004.
7. Rouault, Philippe; et al. Method and system for solving a problem arising during a welding operation or the like. United States Patent Application 20040129759.July 8, 2004.
8. Arndt, Volker; et al. Device and method for determining parameters of a welding system. United States Patent Application 20040094517. May 20, 2004.
9. Correia, D. S., Gonçalves, C. V., Junior, Sebastião S. C. Et al. GMAW welding optimization using genetic algorithms. J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng., Mar 2004, vol.26, no.1, p.28-32. ISSN 1678-5878
10. S.Adolfsson, A.Bahrami, G.Bolsjo and I.Claesson. On-Line Quality Monitoring in Short-Circuit Gas Metal arc Welding. Welding Journal Supplement 1997.
11. Perdomo, L., Obtención de un fundente aglomerado aleado para el recargue a partir de los productos de la reducción de cromitas refractarias cubanas. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. 1999.
12. Gómez, C Y Quintana, R: Obtención de fundente fundido para proceso saw, a partir de materias primas minerales cubanas. Tesis doctoral. 1996.
13. Rodríguez, M.: Electrodo tubular revestido para la recuperación de centralizadores y estabilizadores y piezas que trabajan bajo condiciones similares. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. 1993.
14. Portal, G Y Quintana, R.: Desarrollo de fundentes no fundidos para el relleno de rodillos de bulldozer y piezas que trabajan en condiciones similares. Tesis doctoral. 1994.

15. Cárdenas, Marcelo.: Evaluación y diagnóstico de consumibles para la soldadura por arco eléctrico.

Revista Energética. Vol. XXII, No.2. 2001.

Integral, flexible and shaped method for electric arc welding consumable materials test.

Abstract.

This paper present an integral, flexible and shaped method that make easy the electric arc welding consumable materials test at the designed technological conditions, related to the quality of the welding joint. It is possible to arrive to definitive conclusions about the welding quality using a fixed material through: operational relationship between natural and/or artificial intelligence technical, experts systems, data bases work, simulation, and practical realization of process while are registered certain parameters of the electric arc digital statistic processed and related to the results of the welded joint characterization. The method allows appropriate information registers for each aspect of the process that require process of certification of quality of materials, like the investigation directed to optimization of the material chemical composition and physical properties obtaining very best qualities at certain process. It is also possible to obtain electric arc parameters data bases useful for search, development and valuation of methods and algorithms for real time monitoring of welding quality during fixed technologic process of electric arc welding.

Key words: Test, materials, welding, electric arc, stability, quality, simulation, optimization, welded joint.